植物营养与肥料学报 2016, 22(6): 1441–1448
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.16017
http://www.plantnutrifert.org

吉林省玉米施肥效果与肥料利用效率现状研究

王 寅[1]，冯国忠[1]，焉 莉[1]，高 强[1*]，宋立新[2]，刘振刚[2]，房 杰[2]
（1 吉林农业大学资源与环境学院/吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室，吉林长春 130118；
2 吉林省土壤肥料总站，吉林长春 130012）

摘要:【**目的**】本研究通过收集整理 2005～2013 年国家测土配方施肥项目在吉林省布置的 1110 个“3414”田间试验，分析了施用氮、磷、钾肥对玉米产量、经济效益的影响，测算了氮、磷、钾肥的利用效率，目的在于明确当前生产条件下吉林省玉米的施肥效果与肥料利用效率，为肥料的合理施用与配置提供依据。【**方法**】选取玉米“3414”田间试验的处理 1 ($N_0P_0K_0$)、处理 2 ($N_0P_2K_2$)、处理 4 ($N_2P_0K_2$)、处理 6 ($N_2P_2K_2$) 和处理 8 ($N_2P_2K_0$)，分别记为不施肥 (CK)、不施氮 (–N)、不施磷 (– P)、氮磷钾配施 (NPK) 和不施钾 (–K) 处理，研究不同施肥处理下的玉米产量、产值、施肥利润和产投比，比较增施氮、磷、钾肥的增产效应以及不同肥料的农学效率、偏生产力和肥料贡献率。另外，分析不施肥处理 (缺素处理) 玉米产量与相应肥料贡献率之间的关系，并利用模型进行模拟。【**结果**】不施肥条件下，当前吉林省玉米的平均产量和产值分别为 6.6 t/hm^2 和 1.21 × 10^3 yuan/hm^2。施肥可显著提高玉米的产量和经济收益，其中以 NPK 处理的玉米产量和施肥利润最高，平均分别为 10.1 t/hm^2 和 5.07 × 10^3 yuan/hm^2，其后分别为 –K 处理 (8.9 t/hm^2、3.27 × 10^3 yuan/hm^2)、–P 处理 (8.7 t/hm^2、2.83 × 10^3 yuan/hm^2) 和 –N 处理 (7.7 t/hm^2、1.39 × 10^3 yuan/hm^2)。在其他养分施用基础上，增施氮、磷、钾肥可平均分别增产 2.36 t/hm^2 (35.1%)、1.39 t/hm^2 (18.0%) 和 1.18 t/hm^2 (14.9%)，平均施肥利润分别为 3.68 × 10^3、2.24 × 10^{3}和 1.80 × 10^3 yuan/hm^2。当前生产条件下，吉林省玉米在氮磷钾配施条件下的肥料农学效率、偏生产力和肥料贡献率分别为 11.4 kg/kg N、32.8 kg/kg 和 34.7%，而增施氮、磷、钾肥的平均农学效率分别为 14.3 kg/kg N、20.5 kg/kg P_2O_5 和 17.2 kg/kg K_2O，平均偏生产力分别为 61.1、146.4 和 142.4 kg/kg，平均肥料贡献率分别为 23.4%、14.1% 和 11.9%。分析发现，氮磷钾肥配施 (或某一肥料) 的肥料贡献率随不施肥处理 (或相应缺素处理) 玉米产量的提高而显著下降，且关系符合对数函数模型，说明提高基础地力可减少对外源肥料的依赖。【**结论**】吉林省玉米氮磷钾肥的增产效果和肥料利用率相比全国平均水平较高，但仍需重视氮肥管理以稳产增效，继续大力推广平衡适量施肥理念及相应技术，在实现作物增产的同时提高肥料利用效率并促进土壤培肥。

关键词: 玉米；施肥；产量；经济效益；肥料利用率

中图分类号: S513.062　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008–505X(2016)06–1441–08

Present fertilization effect and fertilizer use efficiency of maize in Jilin Province

WANG Yin[1], FENG Guo-zhong[1], YAN Li[1], GAO Qiang[1*], SONG Li-xin[2], LIU Zhen-gang[2], FANG Jie[2]
(*1 College of Resources and Environmental Sciences/Key Laboratory of Sustainable Utilization of Soil Resources in the Commodity Grain Bases in Jilin Province, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2 Soil and Fertilizer Station of Jilin Province, Changchun 130012, China*)

Abstract:【**Objectives**】About 1110 "3414" field experiments were conducted in Jilin Province during 2005–2013, the data were collected in this paper to evaluate effects of nitrogen (N), phosphorous (P) and potassium (K) fertilizer application on maize yields, economic benefit and current fertilizer use efficiencies, aiming to clarify the present fertilization effect and fertilizer use efficiency in maize production of Jilin Province, and to provide reference for reasonable fertilizer application and allocation.【**Methods**】The five

收稿日期: 2016–01–12　　**接受日期:** 2016–03–04
基金项目: 本研究由公益性行业（农业）科研专项作物最佳养分管理技术研究与应用（201103003）；国家现代农业玉米产业技术体系项目（CARS-02）资助。
作者简介: 王寅（1986—），男，陕西咸阳人，博士，讲师，主要从事植物营养与肥料研究。E-mail：wy1986410@163.com
* 通信作者 E-mail：gyt199962@163.com

treatments, $N_0P_0K_0$, $N_0P_2K_2$, $N_2P_0K_2$, $N_2P_2K_2$ and $N_2P_2K_0$, in the "3414" field experiments of maize were chosen. The maize yields, gross income, fertilizer profit and input-output ratio were investigated, the yield responses to N, P and K fertilizers and the nutrient agronomic efficiency (AE), partial factor productivity (PFP) and fertilizer contribution rate (FCR) were also compared. 【**Results**】In the CK treatment, on average, the grain yield and gross income was 6.6 t/ha and 1.21 × 10^3 yuan/hm^2, respectively. Fertilization treatments increased the maize yield and economic benefit significantly with the highest yield level of 10.1 t/hm^2 and fertilizer profit of 5.07 × 10^3 yuan/hm^2 in the $N_2P_2K_2$ treatment, followed in turn by the $N_2P_2K_0$ treatment (8.9 t/hm^2 and 3.27 × 10^3 yuan/hm^2), the $N_2P_0K_2$ treatment (8.7 t/hm^2 and 2.83 × 10^3 yuan/hm^2) and the $N_0P_2K_2$ treatment (7.7 t/hm^2 and 1.39 × 10^3 yuan/hm^2). On the basis of other nutrient applied, the average yield increases resulted from N, P and K fertilizer application were 2.36 t/hm^2 (35.1%), 1.39 t/hm^2 (18.0%) and 1.18 t/hm^2 (14.9%), respectively, and the average fertilization profits were 3.68 × 10^3, 2.24 × 10^3 and 1.80 × 10^3 yuan/hm^2, respectively. The averaged AEs were 14.3 kg/kg N, 20.5 kg /kg P_2O_5 and 17.2 kg/kg K_2O, respectively; The averaged PFPs of N, P and K fertilizer were 61.1, 146.4 and 142.4 kg/kg nutrient, respectively, and the corresponding fertilizer contribution were 23.4%, 14.1% and 11.9% respectively. The FCR of the $N_2P_2K_2$ treatments showed a significant downtrend with increasing maize yield in the CK treatment (or the corresponding nutrient omission treatment), and the relationship imitated using a logarithmic function model indicated that enhancing soil indigenous fertility could reduce the yield dependence on inorganic fertilizers. 【**Conclusions**】The fertilization responses and fertilizer use efficiencies of maize are relatively high in Jilin Province compared with the national average level of China, the nitrogen fertilizer contribution is still higher than those of P and K fertilizers. Thus, N management should be still strengthened for maintaining high yield and improving N efficiency. The balanced and appropriate fertilization technologies still need to be spread for the simultaneous improvement of crop yield, fertilizer use efficiency and soil fertility.

Key words: maize; fertilization; yield; economic benefit; fertilizer use efficiency

吉林是我国玉米种植大省，2013 年种植面积和总产量分别为 36 万公顷和 2776 万吨，占全国的 9.6% 和 12.7%，平均单产达到 7.93 t/hm^2，为全国最高[1]。吉林玉米主产区主要土壤类型为黑土、黑钙土等，具有腐殖质层厚、有机质含量高、养分丰富、团粒发达、保水保肥能力强等特点，对玉米生长非常有利[2]。但是，随着开垦年限增加和近 30 年玉米连作，黑土区土壤肥力退化已成为不争事实[2–3]。除粗放的耕作方式和种植习惯外，农民过量和不平衡的施肥措施也是导致土壤质量下降、产量不稳定的重要原因[4]。李红莉等[5]研究显示，我国玉米单产在 2000～2007 年间增长了 7.9%，而单位面积肥料用量增加了 29.0%，其中氮肥增加了 37.3%，说明肥料利用率和经济收益明显下降。吉林省统计数据显示，1978 年至 2013 年全省玉米种植面积和总产分别提高了 1.3 倍和 4.7 倍，而同期的化肥施用量从 16.7 万吨增长至 216.8 万吨，提高了近 13 倍[6]。大量研究已证实，过量和不合理的施肥不仅影响作物生产，降低肥料利用效率[7]，还会引发水体富营养化、土壤酸化及大气活性氮增加等一系列环境问题[8–10]。因此，根据作物生长发育特点和土壤条件为农户提供合理的养分管理建议，实现农业生产的高产高效优质是广大科研工作者和农技推广人员一直以来的工作重点和努力方向。

由于土壤肥力、作物产量水平和施肥习惯差异较大，不同地区之间作物养分管理措施的推荐和实施基础也显著不同[11–13]。20 世纪 80 年代，全国化肥试验网在我国 29 个省、市、区的 18 种作物上进行了大量肥料试验，明确了当时条件下不同区域的作物肥效状况与肥料利用效率，对当地作物的合理施肥指导以及国家肥料生产供应政策提供了基础信息[14]。30 多年来，我国的土壤肥力状况、作物品种和施肥水平均发生了巨大变化，而当前区域尺度上较宏观的作物施肥基础信息并不清楚，限制了区域养分管理指导工作的开展。2005 年起，国家在全国范围内开展了测土配方施肥项目，各地区各级农技推广部门采集测试了大量土壤样品，并布置了大量的“3414”作物施肥田间试验，因此可以利用这些大样本的田间试验数据开展内容丰富的施肥相关研究工作[15–16]。张智等[17]利用 292 个“3414”肥料试验，分析了四川省

不同地区水稻施用氮肥的增产效益、氮素需求特征与氮肥的利用效率。刘芬等[18]通过总结 184 个“3414”肥料试验，研究了渭北地区春玉米施用氮、磷、钾肥的增产、增收效果以及肥料利用效率现状。黄亿等[19]基于 61 个“3414”肥料试验，建立了四川中部丘陵区油菜的土壤养分丰缺指标和相应的推荐施肥量。单燕等[20]整理测土配方施肥项目的 7416 个土壤数据和 913 个“3414”肥料试验数据，评估了陕西省玉米种植区土壤肥力状况与施肥效应。本研究通过收集整理测土配方施肥项目在吉林省布置的大量“3414”肥料试验，研究当前生产条件下吉林省玉米施用氮、磷、钾肥的增产效果、经济效益和肥料利用率，并对土壤基础养分状况与肥料贡献率的关系进行分析，旨在明确吉林省玉米的施肥效果与肥料利用现状，为玉米科学施肥管理与决策提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验设计

本研究选取 2005～2013 年国家测土配方施肥项目在吉林省布置的春玉米“3414”田间试验，共计 1110 个。研究区域涵盖吉林省所有县、市、州，主要土壤类型包括黑土、黑钙土、白浆土、暗棕壤、冲积土和草甸土等，试验区耕层土壤 pH 3.7～8.9 (平均 6.6 ± 1.0)、有机质 5.6～123.5 g/kg (平均 25.3 ± 15.1 g/kg)、碱解氮 36.1～392.2 mg/kg (平均 136.0 ± 56.9 mg/kg)、有效磷 1.4～153.9 mg/kg (平均 30.1 ± 23.2 mg/kg)、速效钾 24.0～374.1 mg/kg (平均 125.4 ± 48.4 mg/kg)。供试玉米品种主要包括先玉 335、郑单 958、吉单 198、丹玉 638、良玉 11、郝育 21 等。

本研究所含试验处理选自“3414”试验设计中的处理 1 ($N_0P_0K_0$)、处理 2 ($N_0P_2K_2$)、处理 4 ($N_2P_0K_2$)、处理 6 ($N_2P_2K_2$) 和处理 8 ($N_2P_2K_0$)。其中，$N_2P_2K_2$ 施肥量是由当地农业技术专家或农技推广人员根据目标产量水平、作物养分需求、田块土壤肥力状况以及当地施肥习惯等进行综合确定，代表当地的最佳施肥水平[16]，本研究所收集数据中，氮肥用量为 N 40.1～319.5 kg/hm^2，平均 168.0 ± 24.5 kg/hm^2；磷肥用量为 P_2O_5 30.0～150.0 kg/hm^2，平均 69.7 ± 9.3 kg/hm^2；钾肥用量为 K_2O 22.5～180.0 kg/hm^2，平均 71.6 ± 10.0 kg/hm^2，各缺素处理不施用相应的肥料，其余施肥量与同一试验的 NPK 处理保持一致。试验所用肥料分别为尿素 (N 46%)、过磷酸钙 (P_2O_5 12%) 和氯化钾 (K_2O 60%)。氮肥的 40% 和全部的磷、钾肥做基肥，剩余的 60% 氮肥于玉米七叶期进行追施，其他田间管理均与当地农民习惯保持一致。

1.2　样品采集与测定

玉米播种前，各试验点取 0—20 cm 耕层土壤测定其基本化学性质。用电位法测pH（水土比2.5 ：1）；有机质测定用重铬酸钾容量法；碱解氮用 1 mol/L NaOH 扩散法；有效磷测定用0.5 mol/L NaHCO3浸提—钼锑抗比色法；速效钾测定用 1 mol/L NH4OAc 浸提—火焰光度法[21]。

玉米成熟后，对各试验点所有小区去掉边行后进行实打实收测产。

1.3　参数计算与统计分析

采用以下公式计算相关参数[22–24]：

肥料农学效率 (agronomic efficiency, AE, kg/kg) 指单位施肥量所增加的玉米产量，即，AE = (Y – Y_0)/F，Y 为施肥区玉米产量，Y_0 为无肥区玉米产量，F 为施肥量。

肥料偏生产力 (partial factor productivity, PFP, kg/kg) 指投入单位肥料所生产的玉米产量，即，PFP = Y/F，Y 为施肥区玉米产量，F 为施肥量。

肥料贡献率 (fertilizer contribution rate, FCR) 指施用肥料增加的产量占总产量的百分比，即，FCR = (施肥区产量 – 无肥区产量)/施肥区产量 × 100%。

施肥利润 (Net profit, yuan/hm^2) 定义为产值与施肥成本之差：利润 = 玉米产量 × 玉米价格 – 施肥量 × 肥料价格。

产投比 (input-output ratio) = 施肥利润/施肥成本

采用 Excel 2010 软件计算和处理试验数据，用 SPSS 17.0 软件统计分析，LSD 法检验处理间在 $P < 0.05$ 水平的差异显著性。

2　结果与分析

2.1　施肥对吉林省玉米产量的影响

氮、磷、钾肥施用显著影响吉林省玉米的籽粒产量 (图 1)。不施肥条件下，全省玉米产量范围 1.85～14.3 t/hm^2，平均 6.6 t/hm^2。施肥后玉米产量均显著提高，以 $N_2P_2K_2$ 处理最高，产量范围为 4.31～16.9 t/hm^2，平均达 10.1 t/hm^2，较 CK 处理平均增产 34.7%。各缺素处理中，以 $N_2P_2K_0$ 处理玉米产量较高，达 3.29～15.3 t/hm^2，平均 8.9 t/hm^2，其次为 $N_2P_0K_2$ 处理 (平均 8.7 t/hm^2，范围 3.51～15.8 t/hm^2)，而 $N_0P_2K_2$ 处理相对较低 (平均 7.7 t/hm^2，范围 2.40～13.5 t/hm^2)。在其他两种养分施用基础上，玉米增施氮、磷、钾肥平均分别增产 2.36 t/hm^2 (35.1%)、1.39 t/hm^2 (18.0%) 和 1.18 t/hm^2 (14.9%)。

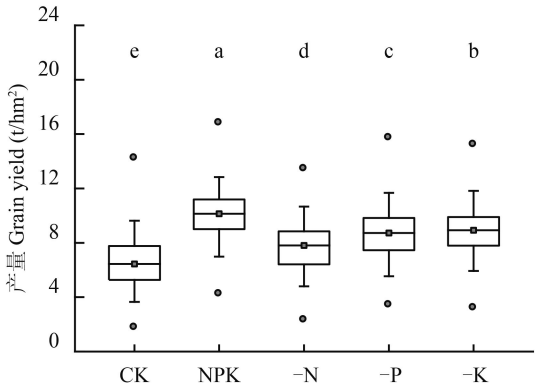

图 1 吉林省施用氮、磷、钾肥的玉米产量

Fig. 1 Maize yields affected by application of N, P and K fertilizers in Jilin Province

[注（Note）: 箱形框中的实线和正方形分别表示数据集的平均值和中值，上下边界分别表示数据集的 25% 和 75% 位分数，上下水平短线表示数据集的 5% 和 95% 区间，箱外上下圆点分别表示数据集的最小值和最大值 The horizontal solid lines and squares inside boxes indicate the mean and the median of dataset, the upper and lower limits of box represent 25% and 75% of dataset, the upper and lower short lines outside box indicate the 5% and 95% of dataset, the upper and lower dots outside box indicate the minimum and maximum, respectively.]

分析增产量和增产率分布状况发现 (图 2)，吉林省玉米施用氮、磷、钾肥分别有 99.1%、94.9% 和 91.1% 的试验点表现出增产效果，增产超过 5% 的试验点比例分别为 95.6%、83.9% 和 75.9%。施氮后，61.1% 的试验点增产在 1.0～3.0 t/hm² 之间，26.3% 的试验点增产超过 3.0 t/hm²，增产率分布在 5%～35% 的试验点占 59.8%，甚至有 6.7% 的试验点增产超过 80%。施磷的增产量范围主要在 0.6～1.8 t/hm² 之间 (占 49.3%)，增产超过 3 t/hm² 占 6.0%，施钾后大部分试验点增产量在 0～1.8 t/hm² (占 69.1%)，有 4.5% 的试验增产超过 3.0 t/hm²。磷、钾肥施用的增产率范围均主要在 5%～25%，分别占总试验数的 60.1% 和 60.4%。结果表明，玉米施用氮肥的增产效果最显著，应在氮磷钾肥配施的基础上重视氮肥的施用。

2.2 施肥对吉林省玉米经济效益的影响

施肥不仅为获得高产，也应考虑成本投入和经济效益 (表 1)。不施肥条件下，吉林省玉米的平均产值为 12.1 × 10³ yuan/hm²。施用氮、磷、钾肥增加了玉米种植的成本投入，不同处理的平均增量在 0.70 × 10³～1.39 × 10³ yuan/hm² 之间，但产值相比 CK 处理均显著提高。NPK 处理玉米的产值、施肥利润和产投比均为最高，平均分别为 18.6 × 10³ yuan/hm²、5.07 × 10³ yuan/hm² 和 3.7。各缺素处理的经济效益相比 NPK 处理显著下降，尤其是 –N 处理，其施肥利润不足 NPK 处理的 1/3，产投比仅为 2.2，说明其施肥的经济回报偏低。在其他养分施用基础上，增施

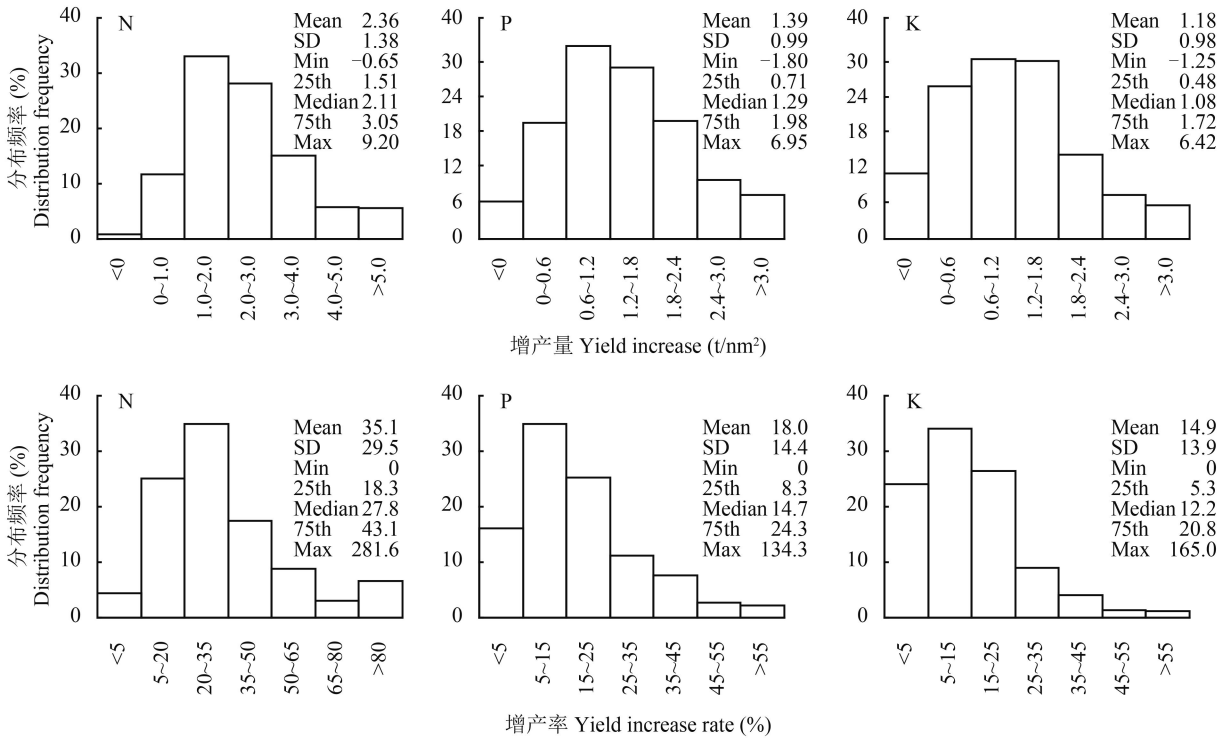

图 2 吉林省玉米施氮、磷、钾肥的增产量和增产率分布频率

Fig. 2 Distribution frequency of maize yield increase and relative rate by applying N, P and K fertilizers in Jilin Province

表 1　施肥对吉林省玉米经济效益的影响 (× 10^3 yuan/hm^2)

Table 1　Effects of the application of N, P and K fertilizers on economic benefit of maize in Jilin Province

处理 Treatment	产值 Gross income		施肥成本 Fertilizer cost		施肥利润 Net profit		产投比 Input-output ratio	
	范围 Range	平均值 Mean	范围 Range	平均值 Mean	范围 Range	平均值 Mean	范围 Range	平均值 Mean
CK	3.41～26.5	12.1 ± 3.4 e						
$N_2P_2K_2$	7.96～31.3	18.6 ± 3.3 a	0.59～2.82	1.39 ± 0.17 a	–1.78～17.5	5.07 ± 2.92 a	0～13.8	3.7 ± 2.1 a
$N_0P_2K_2$	4.43～25.0	14.2 ± 3.4 d	0.34～1.51	0.70 ± 0.08 d	–7.34～10.3	1.39 ± 1.87 d	0～16.9	2.2 ± 2.4 d
$N_2P_0K_2$	6.50～29.2	16.0 ± 3.4 c	0.37～2.25	1.06 ± 0.13 b	–5.80～16.1	2.83 ± 2.82 c	0～14.3	2.8 ± 2.6 c
$N_2P_2K_0$	6.09～28.3	16.4 ± 3.3 b	0.38～1.88	1.02 ± 0.13 c	–3.85～16.6	3.27 ± 2.78 b	0～14.7	3.3 ± 2.7 b

注（Note）: 玉米市场价格按 1.85 yuan/kg 计, N、P_2O_5、K_2O 为价格分别为 4.1、4.75 和 5.2 yuan/kg 计 The market prices are 1.85 yuan/kg for maize, 4.1 yuan/kg for N, 4.75 yuan/kg for P_2O_5 and 5.2 yuan/kg for K_2O.

氮、磷、钾肥的平均施肥利润分别为 3.68 × 10^3、2.24 × 10^3、和 1.80 × 10^3 yuan/hm^2，产投比分别为 5.5、7.1 和 5.2。可见，氮磷钾配施条件下玉米的经济效益最佳，磷钾肥基础上增施氮肥可获得较高利润，而氮钾肥基础上增施磷肥的产投比更高。

2.3　吉林省玉米的肥料利用率现状

目前，吉林省玉米在氮磷钾配施条件下其总养分的平均农学效率、偏生产力和肥料贡献率分别为 11.4 kg/kg (0～35.9 kg/kg)、32.8 kg/kg (14.3 ～63.9 kg/kg) 和 34.7% (0～80.2%)(图 3)。各项指标分布状况显示，NPK 处理总养分的农学效率有 95.9% 的试验点高于 5 kg/kg，主要在 10～15 kg/kg 之间，占总数的 34.9%；偏生产力大部分试验点集中于 25～40 kg/kg 之间，占总数的 79.8%；肥料贡献率超过 15% 的试验点占总数的 94.1%，54.1% 的试验点分布于 25%～45% 之间。

通过比较 NPK 处理和缺素处理，可分析氮、磷、钾单一养分的肥料利用率 (图 4)。目前，吉林省玉米增施氮、磷、钾肥的平均农学效率分别为 N 14.3 kg/kg (N 0～78.6 kg/kg)、P_2O_5 20.5 kg/kg (P_2O_5 0～92.7 kg/kg) 和 K_2O 17.2 kg/kg (K_2O 0～74.2 kg/kg)，平均偏生产力分别为 N 61.1 kg/kg (N 26.9～187.3 kg/kg)、P_2O_5 146.4 kg/kg (P_2O_5 60.2～368.9 kg /kg) 和 K_2O 142.4 kg/kg (K_2O 61.5～317.9 kg/kg)，平均肥料贡献率分别为 23.4% (0～73.8%)、14.1% (0～57.3%) 和 11.9% (0～62.3%)。不同养分的农学效率和偏生产力高低趋势一致，均以磷素 > 钾素 > 氮素，而肥料贡献率则以氮素显著于磷素和钾素。

2.4　吉林省玉米土壤基础供肥能力与肥料贡献率的关系

不施肥处理的作物产量可视作土壤基础供肥能力的一种反映，而缺素处理产量也能在较大程度上反映土壤对某一养分的基础供应能力。图 5 显示，NPK 配施处理的总养分肥料贡献率随 CK 处理产量的增加呈现明显的下降趋势，模型拟合结果均符合

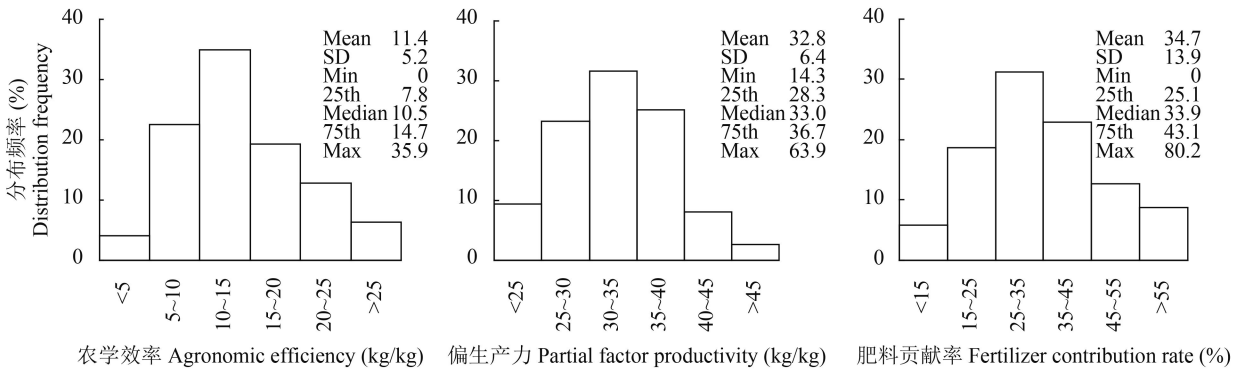

图 3　吉林省玉米氮磷钾肥配施的农学效率、偏生产力和肥料贡献率的分布频率

Fig. 3　Distribution frequency of agronomic efficiency, partial factor productivity, and fertilizer contribution rate of maize in Jilin Province under the balanced NPK fertilization

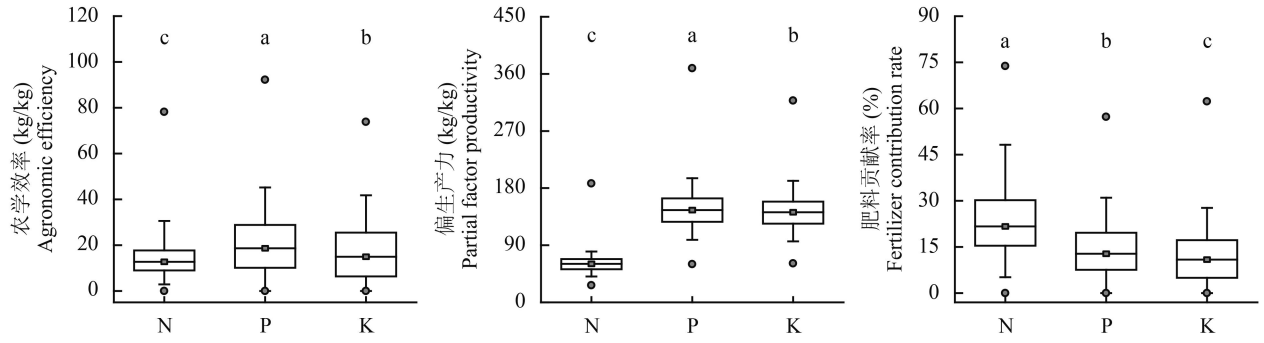

图 4 吉林省玉米氮、磷、钾肥的农学效率、偏生产力和肥料贡献率

Fig. 4 Agronomic efficiency, partial factor productivity and contribution rate of N, P and K fertilizers in maize in Jilin Province

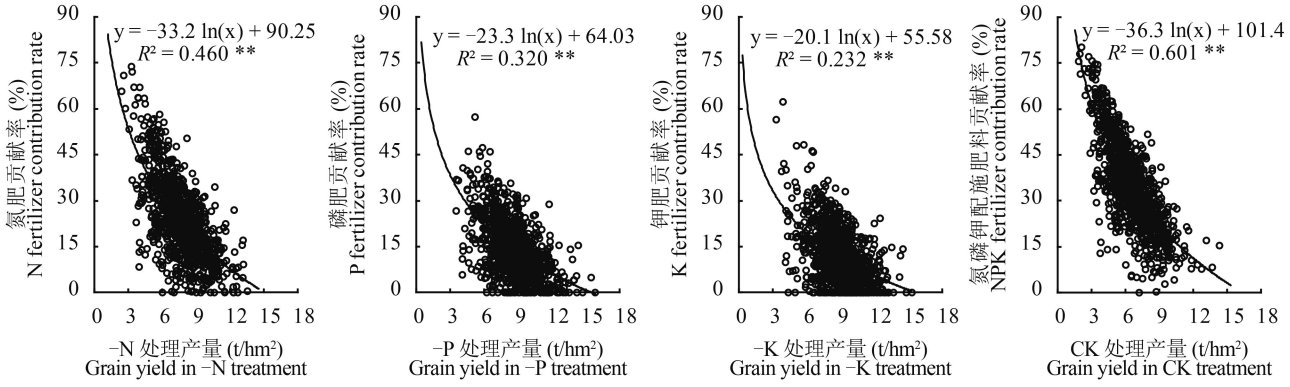

图 5 吉林省玉米土壤基础供肥能力与肥料贡献率的关系

Fig. 5 Relationships between soil indigenous nutrient supply and fertilizer contribution rate of maize in Jilin Province

显著的对数函数关系 (R^2 = 0.601**)。氮、磷、钾单一养分的肥料贡献率与相应缺素处理产量之间也有类似表现，其中以氮肥贡献率与 – N 处理产量的相关程度最高 (R^2 = 0.460**)，且氮肥贡献率随 – N 处理产量增加的下降斜率也最大。结果说明，肥料施用对产量的贡献率随土壤基础养分供应能力的提高而下降，因此增加对土壤的培肥可减少玉米种植中对外源肥料的需求。

3 讨论

本研究显示，吉林省玉米在氮磷钾配施条件下平均产量为 10.1 t/hm²，相应的氮、磷、钾肥用量平均分别为 N 168.0 kg/hm²、P_2O_5 69.7 kg/hm² 和 K_2O 71.6 kg/hm²，总施肥量为 309.3 kg/hm²。这与吉林省地方标准 DB 22/T 2073-2014《玉米施肥技术规程》中的推荐施肥量非常接近 (中等地力条件下，目标产量为 9.0～10.5 t/hm² 时，吉林省玉米推荐施用 N 170～190 kg/hm²、P_2O_5 70～80 kg/hm² 和 K_2O 60～70 kg/hm²)[25]，同时也与前人在吉林不同地区的研究结果基本相符[26–29]。因此，本研究结果可在较大程度上反映吉林省玉米的施肥效果与肥料利用率现状，可为该地区玉米的科学施肥研究与决策提供参考依据。

肥料利用率是养分管理研究中非常重要的评价指标，以往我国主要采用肥料的养分表观回收率进行表征，但在目前土壤和环境养分供应量增大、化肥增产效益下降的情况下，偏生产力更适宜作为评价肥料利用效率的指标[30]。已有研究发现，目前我国玉米在试验条件下的平均氮、磷、钾肥偏生产力分别为 51.6 kg/kg N、72.4 kg/kg P_2O_5 和 64.7 kg/kg K_2O[7]，而世界平均水平分别为 57.8 kg/kg N、119.0 kg/kg P_2O_5 和 136.0 kg/kg K_2O[31]。本研究显示，当前吉林春玉米的平均氮、磷、钾肥偏生产力分别为 61.1 kg/kg N、146.4 kg/kg P_2O_5 和 142.4 kg/kg K_2O，不仅明显高于全国平均水平，也超过了世界平均水平。其中，氮素偏生产力较美国的 65 kg/kg N还有一定差距[30]。农学效率也是重要的肥料效率指标，反映施肥的增产效果。目前，我国玉米在试验条件下的氮、磷、钾肥农学效率分别为 9.8～11.2 kg/kg N、7.5～9.5 kg/kg

P_2O_5 和 5.7～9.2 kg/kg K_2O[7, 32]，而吉林省玉米平均分别为 14.3 kg/kg N、20.5 kg/kg P_2O_5 和 17.2 kg/kg K_2O，均明显高于全国平均水平，但氮素农学效率与世界平均水平 (N 24 kg/kg) 相比还偏低[33]。可见，现阶段生产条件下吉林省玉米的增产效果和肥料利用率与全国平均水平相比较高，而在氮素管理的节肥增效方面还有提升空间。

众多研究显示，世界粮食作物施用化肥对产量的贡献率在 30%～50%，而我国玉米施肥的平均产量贡献率为 46.2%[14, 23, 31, 34–35]。刘芬等[18]研究显示，目前渭北旱塬地区玉米施用氮、磷、钾肥对产量的贡献率分别为 23.0%、12.6% 和 7.0%。本研究中，吉林省玉米的平均氮、磷、钾肥贡献率分别为 23.4%、14.1% 和 11.9%，与刘芬等[18]在陕西的研究结果接近，而氮磷钾配施的平均产量贡献率为 34.7%，低于全国平均水平。这可能是因为吉林省地处黑土带，大多数地区土壤肥力在全国处于相对较高水平，导致外源肥料施用对产量的贡献相对较低。另外发现，玉米施肥的产量贡献率随土壤肥力提升而显著下降，说明维持较高的土壤肥力可减少对外源肥料的需求。在目前国家大力实施化肥零增长战略背景下，吉林省应通过推广平衡施肥、保护性耕作、秸秆还田等技术措施进行土壤培肥，促进农田地力提升而减少化肥施用，提高肥料利用率和环境效益，维持玉米产量处于一个稳定水平。

4　结论

吉林省玉米施肥的增产增收效果显著，其中以 NPK 处理最佳，平均产量和施肥利润分别为 10.1 t/hm^2 和 5.07 × 10^3 yuan/hm^2。增施氮、磷、钾肥可平均分别增产 2.36 t/hm^2 (35.1%)、1.39 t/hm^2 (18.0%) 和 1.18 t/hm^2 (14.9%)，平均分别增收 3.68 × 10^3、2.24 × 10^3、和 1.80 × 10^3 yuan/hm^2。当前生产条件下，吉林省玉米的平均氮、磷、钾肥农学效率分别为 14.3 kg/kg N、20.5 kg/kg P_2O_5 和 17.2 kg/kg K_2O，平均偏生产力分别为 61.1 kg/kg N、146.4 kg/kg P_2O_5 和 142.4 kg/kg K_2O，平均肥料贡献率分别为 23.4%、14.1% 和 11.9%。玉米施肥对产量的贡献率随土壤基础肥力的提高而显著下降，其趋势符合对数函数关系。尽管吉林省玉米施肥的增产效果和肥料利用率在国内相对较高，但仍应重视氮肥管理以稳产增效，现阶段应继续大力推广平衡适量施肥的理念及相应技术，改变农民过量施肥观念，在实现作物增产的同时提高肥料效率和土壤肥力水平。

参 考 文 献：

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
National Bureau of Statistics of China. China sytatistical yearbook 2014 [M]. Beijng: China Statistics Press, 2014.

[2] 赵兰坡, 张志丹, 王鸿斌, 等. 松辽平原玉米带黑土肥力演化特点及培育技术[J]. 吉林农业大学学报, 2008, 30(4): 511–516.
Zhao L P, Zhang Z D, Wang H B *et al*. Fertility evolution characteristics and fertilizing technologies of black soil in the corn belt of the Songliao Plain [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2008, 30(4): 511–516.

[3] 王鸿斌, 陈丽梅, 赵兰坡, 等. 吉林玉米带现行耕作制度对黑土肥力退化的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 301–305.
Wang H B, Chen L M, Zhao L P, *et al*. Influence of present farming system of corn belt on fertility degradation in Jilin province [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(9): 301–305.

[4] 侯云鹏, 孔丽丽, 尹彩侠, 等. 养分专家系统推荐施肥对吉林省玉米产量、养分吸收和利用的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2013, 35(5): 563–567.
Hou U P, Kong L L, Yin C X, *et al*. Effects of fertilizer recommendation based on nutrient expert system on maize yield, nutrient uptake and utilization in Jilin province [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2013, 35(5): 563–567.

[5] 李红莉, 张卫峰, 张福锁, 等. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1136–1143.
Li H L, Zhang W F, Zhang F S, *et al*. Chemical fertilizer use and efficiency change of main grain crops in China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(5): 1136–1143.

[6] 吉林省统计局. 吉林统计年鉴2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
Bureau of Statistics of Jilin province. Jilin statistical yearbook 2014 [M]. Beijng: China Statistics Press, 2014.

[7] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915–924.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, *et al*. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915–924.

[8] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, *et al*. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus [J]. Science, 2009, 323(5917): 1014–1015.

[9] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al*. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. Science, 2010, 327(5968): 1008–1010.

[10] Liu X J, Zhang Y, Han W X, *et al*. Enhanced nitrogen deposition over china [J]. Nature, 2013, 494(7438): 459–462.

[11] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 等. 中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 802–817.
Wu L Q, Wu L, Cui Z L, *et al*. Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production regions in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(4): 802–817.

[12] 王旭, 李贞宇, 马文奇, 等. 中国主要生态区小麦施肥增产效应分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(12): 2469–2476.
Wang X, Li Z Y, Ma W Q, *et al*. Effects of fertilization on yield increase of wheat in different agro-ecological regions of China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(12): 2469–2476.

[13] 单燕, 李水利, 李茹, 等. 陕西省玉米土壤肥力与施肥效应评估[J]. 土壤学报, 2015, 2015, 52(6): 1430–1437.

Shan Y, Li S L, Li R, *et al*. Analysis of soil fertility and fertilizer efficiency of maize field in Shaanxi [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 2015, 52(6): 1430–1437.

[14] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国化肥区划[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1986.
Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences. Zone of fertilizer in China [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1986.

[15] 王圣瑞, 陈新平, 高祥照, 等. “3414”肥料试验模型拟合的探讨[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 409–413.
Wang S R, Chen X P, Gao X Z, *et al*. Study on simulation of"3414"fertilizer experiments [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(4): 409–413.

[16] 陈新平, 张福锁. 通过“3414”试验建立测土配方施肥技术指标体系[J]. 中国农技推广, 2006, 22(4): 36–39.
Chen X P, Zhang F S. Establishing fertilization recommendation index based on 3414 field experiments [J]. China Agricultural Technology Extension, 2006, 22(4): 36–39.

[17] 张智, 王伟妮, 李昆, 等. 四川省不同区域水稻氮肥施用效果研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 234–241.
Zhang Z, Wang W N, Li K, *et al*. Effects of nitrogen fertilization on rice in different regions of Sichuan Province [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(1): 234–241.

[18] 刘芬, 同延安, 王小英, 等. 渭北旱塬春玉米施肥效果及肥料利用效率研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 48–55.
Liu F, Tong Y A, Wang X Y, *et al*. Effects of N, P and K fertilization on spring maize yield and fertilizer use efficiency in Weibei rainfed highland [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014, 20(1): 48–55.

[19] 黄亿, 李廷轩, 张锡洲, 等. 基于“3414”试验的川中丘陵区油菜施肥指标体系构建[J]. 中国农业科学, 2013, 46(10): 2058–2066.
Huang Y, Li T X, Zhang X Z, *et al*. Establishment of fertilization recommendation indexes of rapeseed soil based on the "3414" field experiments in the middle of Sichuan hilly regions [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(10): 2058–2066.

[20] 单燕, 李水利, 李茹, 等. 陕西省玉米土壤肥力与施肥效应评估[J]. 土壤学报, 2015, 2015, 52(6): 1430–1437.
Shan Y, Li S L, Li R, *et al*. Analysis of soil fertility and fertilizer efficiency of maize field in Shaanxi [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 2015, 52(6): 1430–1437.

[21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.

[22] Cassman K G, Peng S, Olk D C, *et al*. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems [J]. Field Crops Research, 1998, 56: 7–39.

[23] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095–1103.
Peng S B, Huang J L, ZHong X H, *et al*. Research strategy in improving fertilizer nitrogen use efficiency of irrigated rice in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(9): 1095–1103.

[24] 王伟妮, 鲁剑巍, 李银水, 等. 当前生产条件下不同作物施肥效果和肥料贡献率研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(19): 3997–4007.
Wang W N, Lu J W, Li Y S, *et al*. Study on fertilization effect and fertilizer contribution rate of different crops at present production conditions [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(19): 3997–4007.

[25] 吉林省农业委员会. DB 22/T 2073–2014吉林省玉米施肥技术规程[S]. 长春: 吉林省质量技术监督局, 2014.
Agriculture committee of Jilin province. DB 22/T 2073–2014 Fertilization Technical Regulation of Corn [S]. Changchun: Quality and Technological Supervision of Jilin Province, 2014.

[26] 任军, 边秀芝, 刘慧涛, 等. 吉林省不同生态区玉米高产田适宜施肥量初探[J]. 玉米科学, 2004, 12(3): 103–105.
Ren J, Bian X Z, Liu H T, *et al*. Preliminary study on optimal fertilizer rate of maize in high-yield land in the different ecological zones of Jilin province [J]. Journal of Maize Sciences, 2004, 12(3): 103–105.

[27] 高玉山, 刘慧涛, 边秀芝, 等. 吉林省西部淡黑钙土玉米钾肥适宜用量初探[J]. 吉林农业科学, 2006, 31(2): 39–41.
Gao Y S, Liu H T, Bian X Z, *et al*. Preliminary study on optimal K fertilizer rate of maize in light chernozem soil in the western Jilin province [J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2006, 31(2): 39–41.

[28] 谢佳贵, 张宽, 王秀芳, 等. 磷肥在黑土春玉米连作区玉米后效作用的研究[J]. 吉林农业科学, 2006, 31(2): 34–38.
Xie J G, Zhang K, Wang X F, *et al*. Study on the aftereffect of P fertilizer on maize in black soil region with continuous spring maize cropping [J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2006, 31(2): 34–38.

[29] 冯国忠, 张强, 顾明, 等. 吉林玉米带春玉米专用肥配方的确定[J]. 中国农学通报, 2010, 26(13): 225–229.
Feng G Z, Zhang Q, Gu M, *et al*. Determination of the formulation of special fertilizer for spring maize in corn belt of Jilin [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(13): 225–229.

[30] 于飞, 施卫明. 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1311–1324.
Yu F, Shi W M. Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1311–1324.

[31] 王激清. 我国主要粮食作物施肥增产效应和养分利用效率的分析与评价[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2007.
Wang J Q. Analysis and evaluation of yield increase of fertilization and nutrient utilization efficiency for major cereal crops in China [D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, , 2007.

[32] 闫湘. 我国化肥利用现状与养分资源高效利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院研究生院博士学位论文, 2008.
Yan X. Study on present status of chemical fertilizer application and high efficient utilization of nutrition in China [D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008.

[33] Ladha J K, Pathak H, Krupnik T J, *et al*. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects [J]. Advances in Agronomy, 2005, 87: 86–156.

[34] 奚振邦. 关于化肥对作物产量贡献的评估问题[J]. 磷肥与复肥, 2004, 19(3): 68–71.
Xi Z B. Evaluation on the contribution of fertilizer to the yield of crop [J]. Phosphate and Compound Fertilizer, 2004, 19(3): 68–71.

[35] Tilman D. Global environmental impacts of agricultural expansion: the need for sustainable and efficient practices [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1999, 96: 5995–6000.